

# Modelo de ahorro de energía en refrigeración

Aplicable a edificios del sector terciario: viviendas, administración, oficinas, comercios, educación y salud.

## Parte I

Autor:  
Jorge Daniel Czajkowski  
Profesor Titular Instalaciones  
Investigador CONICET

IDEHAB - Instituto de Estudios del Hábitat  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Universidad Nacional de La Plata

La Plata, 2003



## 1. INTRODUCCIÓN

En edificios del sector terciario (viviendas, administración, oficinas, educación y salud) del área con mayor población del país es necesario establecer pautas para el mejoramiento de la calidad térmica edilicia junto a otras estrategias de diseño que tiendan a reducir la carga térmica estival, ahorrando energía en refrigeración y mejorando las condiciones de confort.

El cumplimiento de las transmitancias térmicas máximas admisibles de los elementos de cerramiento de un local o edificio puede no ser suficiente para controlar las ganancias de calor totales en el conjunto. De ahí la necesidad de definir un parámetro global que pondere todos los elementos que intervienen en el proceso.

Una vez fijado el valor de  $G_{ENFadm}$  hay varias formas de satisfacerlo: se puede aumentar la resistencia térmica de muros, techos o vidriados, pueden incorporarse protecciones solares en vidriados, pueden usarse vidriados especiales (totalizados, baja emisividad, reflectantes, etc), pueden reducirse las cargas internas de calor, entre otras. Todas estas modificaciones son posibles siempre que no se transgreda el cumplimiento de las condiciones de confort no contempladas en esta norma.

Respecto de la forma de un edificio, es importante destacar que aunque dos construcciones sigan idénticas normas de aislamiento térmico en todos sus elementos, las pérdidas o ganancias de calor globales serán distintas en la medida que difieran de la forma. La mayor compacidad del edificio disminuye las pérdidas y ganancias de calor reduciendo el volumen a climatizar.

Es por esto que el concepto de aislamiento térmico, desde el punto de vista de las condiciones de habitabilidad y consumo de energía, incluye no solo la obtención de una mejor calidad de aislamiento térmico de la envolvente, sino además una adecuada selección de la orientación, de la eficiencia de las protecciones solares, de la forma y de un adecuado diseño de los espacios a climatizar respecto de función y aportes internos de calor total (personas, iluminación, equipamiento).

## 2. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

- 2.1. Este modelo establece el método de cálculo del coeficiente volumétrico de refrigeración ( $G_{ENF}$ ), el cual permite evaluar el ahorro de energía en refrigeración en edificios destinados a vivienda, oficinas, administración, comercio, educación y salud.
- 2.2. Este modelo propone además los parámetros de ahorro de energía para refrigerar locales o edificios del sector terciario a través de valores máximos admisibles de Carga Térmica en Refrigeración ( $CTR_{adm}$ ) y del coeficiente volumétrico de refrigeración ( $G_{ENFadm}$ ).
- 2.3. Este modelo es aplicable a edificios del sector terciario refrigerados que cumplen conjuntamente con las normas IRAM 11605, IRAM 11625 e IRAM 11604.
- 2.4. Este modelo es de aplicación en las zonas bioambientales I, II, III y IV, discriminadas por sus grados día y temperaturas efectivas corregidas en que se ha clasificado la República Argentina, establecidas en la Norma IRAM 11603 así como en todas aquellas localidades de otras zonas donde los grados día son inferiores a 1950 °C o la temperatura efectiva corregida es superior a 21,2°C.

### 3. DEFINICIONES

En este apartado se proponen definiciones y términos usuales utilizados en aire acondicionado y que no se encuentran mencionados en la Norma IRAM 11549/1993. En otros casos las unidades usuales difieren del usado por IRAM y debería ser contemplado.

*Ábaco psicométrico.* El diagrama que se representa todos los parámetros físicos de una mezcla de aire húmedo. El rango habitual en la práctica del aire acondicionado corresponde a temperaturas normales ( $-5^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ) y para presión atmosférica normal, 760 mm de mercurio [mmHg].

*Aire acondicionado [AA]:* Resultado de la combinación en grado adecuado, bajo control automático y sin ruidos molestos de las funciones de calefacción, humectación, filtrado, circulación, ventilación, refrigeración y deshumectación; para proporcionar en verano, invierno o durante todo el año, la atmósfera interior más saludable y confortable para la vida de las personas, minimizando el consumo de energía (Definición modificada del Instituto Argentino de Electricidad Aplicada).

*BTU: British Thermal Unit.* Unidad térmica inglesa. Es la cantidad de calor necesario que hay que sustraer a 1 libra de agua para disminuir su temperatura  $1^{\circ}\text{F}$ . Una BTU equivale a 0,252 Kcal.

*Caloría:* Una caloría es la cantidad de calor que tenemos que añadir a 1 Kg de agua a  $150^{\circ}\text{C}$  de temperatura para aumentar esta temperatura en  $1^{\circ}\text{C}$ . Es equivalente a 4 BTU.

*Calor latente:* Es el calor que, sin afectar a la temperatura, es necesario adicionar o sustraer a una sustancia para el cambio de su estado físico. Específicamente en psicrometría, el calor latente de fusión del hielo es  $h_f = 79,92 \text{ Kcal/kg}$ .

*Calor sensible:* Es el calor empleado en la variación de temperatura de una sustancia cuando se le comunica o sustrae calor.

*Calor total (entalpía):* Es la suma del calor sensible y el latente en kilocalorías, por kilogramo de una sustancia, entre un punto arbitrario de referencia y la temperatura y estado considerado.

*Carga de acondicionamiento:* Se entiende como la cantidad de calor que hay que extraer en verano o incorporar en invierno al interior de una edificación para producir y mantener un espacio acondicionado a ciertos niveles de temperatura, humedad y calidad del aire y cuyo cálculo determinará las características y dimensiones de la instalación termomecánica.

*Carga de acondicionamiento. Clasificación:* Las cargas de acondicionamiento de verano se dividen por la *FORMA* y por la *FUENTE*. Por la *Forma* se divide en *calor sensible* y *calor latente* y por la *Fuente* se subdivide en tres componentes: externas, internas y ventilación.

*Fuentes externas:* Cuando las ganancias de calor provienen del exterior por transmisión a través de la envolvente debido a la diferencia de temperatura entre el aire exterior y el aire interior. Entendiendo a la temperatura del aire exterior como la *Temperatura exterior de Diseño de verano [TDMX]* definida en la Norma IRAM 11603 y la temperatura interior como la correspondiente al confort deseado en el local en función del tipo de actividad a desarrollarse y el nivel de calidad estipulado. Cuando las ganancias de calor provienen del sol que afecta de forma directa a las superficies vidriadas como *Carga Térmica Solar [CTS]* y de manera indirecta en forma retardada por conducción a través de la envolvente.

*Fuentes internas:* Cuando las ganancias de calor provienen del interior del local debido a la presencia de *personas* que disipan calor sensible y calor latente; *iluminación* que disipa calor sensible y *otras fuentes* que pueden disipar calor sensible y/o calor latente.

*Ventilación:* Cantidad variable de calor sensible y calor latente proveniente del aire exterior que debe ser compensado por el sistema termomecánico. La cantidad tendrá un mínimo para evitar el enviciamiento del aire interior y un máximo determinado por el tipo de actividad a desarrollar en el local o edificio a acondicionar.

*Cambio de la condición del aire:* Los procesos de calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación que tienen lugar en el acondicionamiento del aire modifican la condición del aire desde la representada por el punto de estado inicial en el ábaco hasta una condición diferente, representada por un segundo punto en el ábaco.

*Composición del aire:* El aire seco es una mezcla de gases constituida fundamentalmente por un 77% de nitrógeno y 22% de oxígeno. El resto lo componen pequeñas cantidades de otros gases como anhídrido carbónico junto a gases inertes como argón, neón, etc y elementos en suspensión que contaminan el aire como polvos, humos, microorganismos (bacterias, virus, acaros, amebas, esporas y hongos, etc), gases nocivos, entre otros. La cantidad de vapor de agua es muy variable y constituye la *humedad atmosférica*.

*COP (Coefficient of Performance):* Coeficiente de prestación. Es el cociente entre la potencia calorífica total disipada en vatios y la potencia eléctrica total consumida, durante un período típico de utilización.

*Depresión del termómetro húmedo, o diferencia psicrométrica:* Es la diferencia de temperatura entre el termómetro seco y el termómetro húmedo.

*Entalpía, o contenido total de calor [H]:* es una cantidad que indica el contenido de calor de la mezcla de aire y vapor de agua, por encima de 0°C \*. Se expresa en Kcal por kilogramo de aire seco. Los valores de entalpía se marcan sobre una escala especial arriba de la línea de saturación.

\* En el sistema inglés de unidades, el calor del aire se cuenta a partir de 0°F y el del agua a partir de 32°F (= 0°C)

*Frigoría:* Una frigoría es la cantidad de calor que tenemos que sustraer a 1 Kg de agua a 15°C de temperatura para disminuir esta temperatura en 1°C. Es equivalente a 4 BTU.

*Frío:* El frío, por definición, no existe. Es simplemente una sensación de falta de calor.

*Humedad:* Es la condición del aire con respecto a la cantidad de vapor de agua que contiene.

*Humedad absoluta (densidad del vapor):* Es el peso del vapor de agua por unidad de volumen de aire, expresada en gramos por metro cúbico de aire.

*Humedad específica [W]* es el contenido real de agua en la atmósfera. Es el peso del vapor de agua por unidad de peso de aire seco, en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco.

*Humedad relativa [HR]:* es la relación de la presión de vapor de agua en el aire a la presión del vapor saturado a la misma temperatura. Con sólo un pequeño error, puede decirse que la humedad relativa es igual al tanto por ciento de saturación del aire, es decir; la relación de la humedad específica verdadera  $W$  a la humedad específica de saturación  $W_s$ . En el ábaco psicrométrico, las líneas de humedad relativa son curvas que comienzan abajo a la izquierda y se curvan hacia arriba y la derecha. El volumen específico es la recíproca de la densidad y se expresa en metro cúbico por kilogramo de aire seco. Las líneas de volumen específico constante se originan en el eje de TBS y suben hacia arriba con ligera inclinación hacia la izquierda.

Se puede expresar de la siguiente manera:  $HR = h_e / h_{es}$  ; donde  $H_R$  es la humedad relativa %,  $h_e$  es la humedad específica a una temperatura  $t$  °C (gr/Kg), y  $h_{es}$  es la humedad específica de saturación a una temperatura  $t$  °C (gr/Kg).

*Normas UNE, ARI Y ASHRAE* (capacidad): Son las frigorías hora producidas por un acondicionador a 35°C (95°F) de temperatura seca exterior y 23,8°C (75°F) de temperatura húmeda exterior, con el aire de la habitación retornando al acondicionador a 26,6°C (80°F) de temperatura seca y 19,4°C (67°F) de temperatura húmeda.

*Procesos de cambio de la condición del aire*: Hay cinco procesos posibles: *procesos de calor sensible constante* (indicados por una temperatura de bulbo seco constante); *procesos de calor latente constante* (indicados por un contenido de humedad constante y una temperatura de punto de rocío constante); *procesos de entalpía constante o adiabáticos* (indicados por una temperatura de bulbo húmedo constante); *procesos de humedad relativa constante* (todos los demás factores varían) y *una combinación cualquiera de los anteriores* y que no procede a lo largo de ninguna de las líneas de procesos anteriores.

*Salto térmico*: Es toda diferencia de temperaturas. Se suele emplear para definir la diferencia entre la temperatura del aire de entrada a un acondicionador y la de salida del mismo y también para definir la diferencia entre la temperatura del aire en el exterior y la del interior.

*Temperatura de bulbo húmedo (termómetro húmedo) [TBH]*: Es la temperatura indicada por un termómetro, cuyo depósito está envuelto con una gasa o algodón empapados en agua, expuesto a los efectos de una corriente de aire intensa y/o que se revolea en el aire. Las temperaturas de bulbo húmedo se representan por rectas que se originan en la línea de saturación y caen hacia abajo y la derecha en un ábaco psicrométrico. Las líneas de bulbo húmedo son líneas de calor total constante (entalpía constante).

*Temperatura de bulbo seco (termómetro seco) [TBS]*: Es la temperatura del aire, indicada por un termómetro ordinario. Las temperaturas de bulbo seco se representan como líneas verticales que tienen su origen en la escala de temperaturas de bulbo seco (eje horizontal). Las líneas de bulbo seco son líneas de calor sensible constante.

*Temperatura de punto de rocío (TPR)* es la temperatura del aire en la condición de saturación o la temperatura a la que el aire debe descender o que debe ser enfriado para que comience la condensación de la humedad contenida en el mismo. Las temperaturas de punto de rocío están representadas por puntos de la línea de saturación. En saturación, punto de rocío = bulbo húmedo = bulbo seco. Las líneas de punto de rocío son líneas de calor latente constante.

*Tonelada de refrigeración (ton)*: Es equivalente a 3.000 F/h., y por lo tanto, a 12.000 BTU/h.

*Zona de confort*: Son unas condiciones dadas de temperatura y humedad relativa bajo las que se encuentran confortables la mayor parte de los seres humanos. Estas condiciones oscilan entre los 22° y los 27°C (71-80°F) de temperatura y el 40 al 60 por 100 de humedad relativa.

#### **4. TABLAS Y DATOS USUALES EN LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA TÉRMICA DE VERANO.**

**Tabla 1:** Valores de temperatura y humedad relativa de confort para algunos locales típicos.

TIPO DE LOCAL	TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA (%)		
	Máximo confort	Normal	Mínima
Viviendas, locales	23° C - 50%	<b>25° C - 50%</b>	26° C - 55%
Oficinas y, despachos	23° C - 50%	<b>25° C - 50%</b>	26° C - 55%
Bailes, salas de fiestas	23° C - 50%	24° C - 50%	25° C - 50%
Tiendas, bancos, bares. (permanencia de 15 a 40 minutos)	25° C - 50%	26° C - 40/50 %	27° C - 40/50 %
Cines y teatros	24° C - 50%	25° C - 50%	27° C - 50%
Restaurantes	24° C - 50 %	25° C - 50 %	26° C - 55%
Temperaturas interiores nocturnas	22° C - 50%	23° C - 50%	25° C - 50%

NOTA: No es aconsejable crear una diferencia de temperatura entre el exterior y el interior mayor de 10 a 12°C. Para 44°C de temperatura base exterior, podría llegarse a una temperatura interior mínima de 30°C: para temperaturas intermedias se puede seguir el siguiente cuadro:

**Tabla 2:** Valores de temperatura de confort interior recomendados en función de la temperatura exterior de diseño.

TEMPERATURA EXTERIOR	TEMPERATURA INTERIOR DE CONFORT		
	Lujo	Normal	Reducida
35 °C - 95°F	24°C - 75,2°F	<b>25 °C - 77°F</b>	26°C - 78,8°F
38 °C 100°F o Superior	26°C - 78,8°F	27°C - 80,6°F	29°C - 84,2°F

**Tabla 3:** Valores recomendados de temperatura en climatización invernal para diversos tipos de locales.

TIPO DE LOCAL	TEMPERATURAS INTERIORES (°C - °F)					
	Calefacciones de lujo		Calefacciones normales		Calefacciones reducidas	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
Habitación de estar	21	69,8	20	68	18	64,4
Comedor privado	21	69,8	20	68	18	64,4
Comedor colectivo	20	68	18	64,4	18	64,4
Retrete, aseos, duchas	21	69,8	20	68	18	64,4
Dormitorios	21	69,8	20	68	18	64,4
Aulas con gran número de alumnos	20	68	18	64,4	17	62,6
Teatros y cines	20	68	18	64,4	17	62,6
Hospitales salas de enfermos	23	73,4	22	71,6	20	68
Talleres y fábricas	20	68	18	64,4	17	62,6
Escaleras, portales	17	62,6	15	59	17	62,6
Garajes	7	44,6	5	41	5	41
Pasillos, entradas, circulación	20	68	18	64,4	15	59
Oficinas privadas	20	68	18	64,4	18	64,4
Tiendas	21	69,8	20	68	18	64,4
Gimnasios	15	59	15	59	15	59
Iglesias, locales públicos	20	68	18	64,4	18	64,4

Idem, conservando los abrigos	18	64,4	15	59	15	59
-------------------------------	----	------	----	----	----	----

**Tabla 4:** Factor de protección solar en ventanas y aberturas.

<b>Exterior</b>	<b>Color Claro</b>	<b>Color</b>
Cortina de enrollar madera	0.25	0.30
Cortina de enrollar plástica	0.30	0.35
Cortina metálica	0.30	0.40
Parasol fijo - Toldo metálico - Ventana en sombra	0.20	0.25
Postigo de madera o metálico	0.30	0.35
Vidrio transparente	0.86	
Vidrio esmerilado o grabado	0.80	
Bloques de vidrio	0.74	
Vidrio tonalizado claro	0.65	
Vidrio tonalizado oscuro	0.45	
<b>Interior</b>	<b>Color Claro</b>	<b>Color</b>
Cortina de tela liviana	0.70	0.75
Cortina de tela pesada	0.60	0.70
Tela Vinílica	0.65	0.75
Veneciana o Americana	0.50	0.70

**Tabla 5:** Niveles de iluminación recomendados por IRAM según tipo de local y tipo de iluminación.

DESTINO	ACTIVIDAD	Nivel Iluminación Lux	Fluorescente W/ m <sup>2</sup>	Incandescente W/ m <sup>2</sup>	Dicroica W/ m <sup>2</sup>
Vivienda	Mínima	200	8	20	30
	Mediana	250	10	25	38
	Máxima	300	12	30	45
Oficina	Mínima	300	12	30	45
	Mediana	400	16	40	60
	Máxima	500	20	50	75
Comercio	Mínima	300	12	30	45
	Mediana	400	16	40	60
	Máxima	500	20	50	75
Industria	Mínima	200	8	20	30
	Mediana	400	16	40	60
	Máxima	500	20	50	75
Otro destino	Mínima	200	8	20	30
	Mediana	300	12	30	45
	Máxima	400	16	40	60

**Tabla 6:** Coeficiente térmico para diferentes tipos de iluminación.

	<b>Tipo de Luminaria</b>	<b>Coeficiente Térmico</b>
	Lámpara fluorescente	1.25
	Lámpara incandescente	1.00
	Lámpara incandescente halógena (dicroicas)	1.25



**Tabla 7:** Valores orientativos para determinar la cantidad de personas en locales tipo.

Destino	m <sup>2</sup> por persona
<i>a</i> Sitios de asambleas, auditorios, salas de conciertos, salas de baile, pub.	1
<i>b</i> Salas de conferencias, Aulas, Templos	2
<i>c</i> Lugares de trabajo general. Locales comerciales, mercados, restaurantes	3
<i>d</i> Oficinas privadas, consultorios, oficinas profesionales	4
<i>e</i> Salones de billares, canchas de bolos, gimnasios, videojuegos	6
<i>f</i> Edificios de oficinas, bancos, bibliotecas, clínicas, asilos, internados, casas de baño	8
<i>g</i> Viviendas privadas y colectivas	12
<i>h</i> Edificios industriales, el número de ocupantes será fijado por el Propietario, en su defecto será:	16

**Tabla 8:** Valores de calor sensible, latente y total, producidos por diversos artefactos.

EQUIPO	CALOR SENSIBLE Qs. (W)	CALOR LATENTE Qi (W)	CALOR TOTAL Qt. (W)
<b>Aparatos Eléctricos</b>			
Aspiradora	500	0	500
Cafetera	23	60	290
Computadora de escritorio o “desktop”	200-300	0	200-300
Computadora tipo “notebook”	45	0	45
Equipo de Audio	15	0	150
Fotocopiadora	500	0	500
Heladera común	310	0	310
Heladera c/Freezer	360	0	360
Impresora tipo inyección a tinta	15 - 35	0	15 - 35
Impresora tipo laser	450 - 1100	0	450 - 1100
Lavarropas	300	0	300
Monitor	45	0	45
Motores, por HP	645	0	645
Plancha	700	0	700
Proyector de diapositivas	500 - 1500	0	500 - 1500
Secador de pelo	675	115	790
Televisor	300	0	300
Tostadores	800	200	1000
Ventilador	50 - 150	0	50 - 150
<b>Aparatos a Gas</b>			
Horno (coc. gas nat.) (x m3/ h)	6977	3373	10350
Mechero Bunsen Grande	977	267	1244
Pequeño Mechero de Bunsen	280	70	350
Alimentos por persona	8	8	16
Cafetera de 11 Lts.	849	849	1698
Calentador de agua (2 Lts.)	116	29	145
Calienta platos	2687	1419	4106
Freidora	123	820	2053
Horno	1326	1326	2652
Parrilla	4216	1064	5280

**Tabla 9:** Cantidad de aire recomendado para ventilación de locales tipo según intensidad de actividad en verano e invierno.

DESTINO	ACTIVIDAD	Verano	Verano/ Invierno	Invierno - Renovaciones Horarias	
		m <sup>3</sup> / min/pers.	Caudal de aire m <sup>3</sup> /h/persona	Mínima	Recomendada
Vivienda	Mín - <b>Med</b> - Máx	0,58 - <b>0.58</b> - 0.58	15	1,2	1,5
Oficina	Mín - <b>Med</b> - Máx	0,50 - <b>0.50</b> - 0,50	15	1,2	1,5
Comercio	Mín - Med - Máx	0,33 - 0,50 - 0,83	15 - 20 - 25	1,2 - 1,5 - 2,0	1,5 - 2,0 - 2,5
Industria	Mín - Med	0,33 - 0,50	15 - 20	1,2 - 1,5	1,5 - 1,2
Bares	Med - Máx	0.50 - 1,5	30 - 90	2,0	3,0
Sala operación	Mín	2	120	10	20
Cine, teatro	Mín	0,6	36	2,5	3,5

#### 4.1. Datos de radiación solar

En la determinación de la CTR es necesario utilizar valores de radiación solar horaria discriminados por orientación (azimut) a fin de contar con el valor adecuado para cada plano horizontal y vertical que compone la envolvente del local o edificio analizado.

A fin de facilitar y simplificar la implementación de esta variable se decidió tomar el valor más alto de radiación solar para localidades que integran cada zona bioambiental en la que se contara con valores del índice de claridad atmosférica  $K_t$  determinados por la Red Solarimétrica Argentina. Dado que estos valores son medios mensuales se requiere contar con un modelo de cálculo que discrimine en valores horarios y en las componentes directa – difusa y reflejada la radiación solar. Para esto se utilizó el programa Radiac2 ([www.arquinstal.net/bioclim/radiac2.exe](http://www.arquinstal.net/bioclim/radiac2.exe)) que implementa el modelo de Liu&Jordan con arreglos de Orgill&Holland para la radiación difusa. Este ya fue utilizado en la determinación de la radiación solar global sobre el plano horizontal  $H$  del antecedente de la norma IRAM 11603 “Tabla de datos bioclimáticos de 164 localidades de la República Argentina” (Czajkowski, 1993).

Para cada zona bioambiental se eligieron las siguientes localidades relevantes por tamaño, jerarquía político institucional y disponibilidad de datos.

Zona Bioamb	Localidad	Latitud	Kt enero	H horiz [MJ/m <sup>2</sup> ]
Ia:	<b>Santiago del Estero</b>	27.45	0.51	<b>21.60</b>
	Roque S. Peña	27	0.53	22.40
	La Rioja	29	0.53	22.50
Ib	<b>Posadas</b>	27.4	0.52	<b>22.00</b>
	Corrientes	27	0.57	24.10
IIa	<b>Catamarca</b>	28.45	0.56	<b>23.80</b>
IIb	Paraná	31.78	0.56	23.90
	<b>Tucumán</b>	26.83	0.44	<b>18.60</b>
	Monte Caseros	30	0.57	24.30
IIIa	Salta	24.85	0.48	20.20
	Cordoba	31	0.53	22.60
	<b>San Luis</b>	33.27	0.59	<b>25.20</b>
IIIb	<b>La Plata</b>	34.97	0.56	<b>23.90</b>
	Aeroparque	34.90	0.50	21.40
IVa	<b>Mendoza</b>	32.83	0.57	<b>24.30</b>
IVb	Malargue	35.5	0.59	25.20
	<b>Neuquén</b>	38.95	0.59	<b>25.20</b>

IVc	<b>Bahia Blanca</b>	38.73	0.59	<b>25.20</b>
	Necochea	38	0.51	21.80
	Viedma	40	0.60	25.60
IVd	<b>Mar del Plata</b>	37.93	0.56	<b>24.00</b>

**Tabla 11a:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona Ia

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	121	138	293	306	168	49	49	49	49
7	275	170	329	360	247	113	113	112	113
8	419	201	349	393	308	171	171	171	171
9	542	227	354	403	347	222	222	222	222
10	637	261	342	389	361	275	261	261	261
11	697	285	314	351	350	311	285	285	285
12	717	293	293	293	314	323	314	293	293
13	697	285	285	285	285	311	350	351	314
14	637	261	261	261	261	275	361	389	342
15	542	227	222	222	222	222	347	403	354
16	419	201	171	171	171	171	308	393	349
17	275	170	113	112	113	113	247	360	329
18	121	138	49	49	49	49	168	306	293
Total diaria W/m²	6095	2941	3468	3695	3229	2603	3229	3695	3468
idem MJ/m²/día	21.94	10.59	12.49	13.30	11.63	9.37	11.63	13.30	12.49

**Tabla 11b:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona Ib

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	135	175	399	417	219	48	48	48	48
7	307	192	420	466	312	109	109	109	109
8	468	208	422	486	362	166	166	166	166
9	606	222	405	476	394	215	215	215	215
10	712	252	369	437	397	272	252	252	252
11	779	276	317	371	369	312	276	276	276
12	801	284	284	284	314	326	314	284	284
13	779	276	276	276	276	312	369	371	317
14	712	252	252	252	252	272	397	437	369
15	606	222	215	215	215	215	394	476	405
16	468	208	166	166	166	166	362	486	422
17	307	192	109	109	109	109	312	466	420
18	135	175	48	48	48	48	219	417	399
Total diaria W/m²	6811	3056	3816	4143	3469	2566	3469	4143	3816
idem MJ/m²/día	24.52	11.00	13.74	14.91	12.49	9.24	12.49	14.91	13.74

**Tabla 11c:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IIa

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	132	157	345	361	195	50	50	50	50
7	294	180	372	412	276	112	112	112	112
8	445	202	383	439	337	170	170	170	170
9	574	221	376	439	273	219	219	219	219
10	674	257	352	412	382	279	257	257	257
11	736	281	312	361	364	318	281	281	281
12	758	289	289	289	319	331	319	289	289
13	736	281	281	281	281	318	364	361	312
14	674	257	257	257	257	279	382	412	352
15	574	221	219	219	219	219	373	439	376
16	445	202	170	170	170	170	337	439	383
17	294	180	112	112	112	112	276	412	372
18	132	157	50	50	50	50	195	361	345
Total diaria W/m <sup>2</sup>	6469	2991	3633	3925	3378	2631	3378	3925	3633
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	23.29	10.77	13.08	14.13	12.16	9.47	12.16	14.13	13.08

**Tabla 11d:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IIb

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	113	126	260	271	151	49	49	49	49
7	263	164	300	327	228	112	112	112	112
8	401	199	327	364	289	172	172	172	172
9	521	229	338	380	330	223	223	223	223
10	612	262	334	373	347	272	262	262	262
11	670	287	313	344	341	306	287	287	287
12	690	295	295	295	311	318	311	295	295
13	670	287	287	287	287	306	341	344	313
14	612	262	262	262	262	272	347	373	334
15	521	229	223	223	223	223	330	380	338
16	401	199	172	172	172	172	289	364	327
17	263	164	112	112	112	112	228	327	300
18	113	126	49	49	49	49	151	271	260
Total diaria W/m <sup>2</sup>	5846	2897	3353	3543	3130	2582	3130	3543	3353
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	21.05	10.43	12.07	12.76	11.27	9.29	11.27	12.76	12.07

**Tabla 11e:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IIIa

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	166	189	441	467	252	56	56	56	56
7	334	187	446	509	340	112	112	112	112
8	491	186	431	521	402	165	165	165	165
9	626	210	397	501	434	236	210	210	210
10	729	245	346	450	434	306	245	245	245
11	794	266	282	373	401	351	266	266	266
12	816	274	274	274	339	366	339	274	274
13	794	266	266	266	266	351	401	373	282
14	729	245	245	245	245	306	434	450	346
15	626	210	210	210	210	236	434	501	397
16	491	186	165	165	165	165	402	521	431
17	334	187	112	112	112	112	340	509	446
18	166	189	56	56	56	56	252	467	441
Total diaria W/m <sup>2</sup>	7119	2981	3835	4315	3722	2822	3722	4315	3835
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	25.63	10.73	13.81	15.54	13.40	10.16	13.40	15.54	13.81

**Tabla 11f:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IIIb

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	141	146	370	407	289	51	51	51	51
7	300	151	382	453	367	109	109	109	109
8	449	163	376	472	420	170	163	163	163
9	577	210	353	462	444	259	210	210	210
10	675	245	313	423	438	327	245	245	245
11	736	268	268	360	402	370	268	268	268
12	757	275	275	275	338	384	338	275	275
13	736	268	268	268	268	370	402	360	268
14	675	245	245	245	245	327	438	423	313
15	577	210	210	210	210	259	444	462	353
16	449	163	163	163	163	170	420	472	376
17	300	151	109	109	109	109	367	453	382
18	141	146	51	51	51	51	289	407	370
Total diaria W/m <sup>2</sup>	6523	2749	3519	4040	3825	2963	3825	4040	3519
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	23.48	9.90	12.67	14.54	13.77	10.67	13.77	14.54	12.67

**Tabla 11g:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IVa

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
6	158	177	403	425	232	56	56	56	56
7	322	183	415	471	317	114	114	114	114
8	474	189	409	488	379	168	168	168	168
9	605	214	384	475	413	235	214	214	214
10	705	250	343	434	417	302	250	250	250
11	768	272	288	368	391	344	272	272	272
12	790	280	280	280	336	359	336	280	280
13	768	272	272	272	272	344	391	368	288
14	705	250	250	250	250	302	417	434	343
15	605	214	214	214	214	235	413	475	384
16	474	189	168	168	168	168	379	488	409
17	322	183	114	114	114	114	317	471	415
18	158	177	56	56	56	56	232	425	403
Total diaria W/m <sup>2</sup>	6875	2974	3742	4165	3620	2801	3620	4165	3742
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	24.75	10.70	13.47	14.99	13.03	10.08	13.03	14.99	13.47

**Tabla 11h:** Datos de radiación solar total (directa+difusa+reflejada) para la zona IVb/c/d

hora	Horiz.	Sur	SE	Este	NE	Norte	NO	Oeste	SO
5	33	202	427	408	157	11	11	11	11
6	190	188	442	475	266	64	64	64	64
7	347	174	438	513	356	116	116	116	116
8	492	165	414	521	420	170	165	165	165
9	618	207	372	498	454	265	207	207	207
10	714	240	315	445	455	339	240	240	240
11	774	260	260	366	423	385	273	260	260
12	795	267	267	267	361	400	361	267	267
13	774	260	260	260	273	385	423	366	260
14	714	240	240	240	240	339	455	445	315
15	618	207	207	207	207	265	454	498	372
16	492	165	165	165	165	170	420	521	414
17	347	174	116	116	116	116	356	513	438
18	190	188	64	64	64	64	266	475	442
19	33	202	11	11	11	11	157	408	427
Total diaria W/m <sup>2</sup>	7131	2993	3842	4419	3922	3106	3922	4419	3842
idem MJ/m <sup>2</sup> dia	25.67	10.77	13.83	15.91	14.12	11.18	14.12	15.91	13.83

**5. DEFINICIONES:** continuación de la Parte 1.

**Acimut:** ángulo del plano horizontal que forma una dirección cualquiera con una dirección de referencia. Se dice sobre todo de la proyección de los rayos del sol.

**Albedo:** Factor de reflexión de una superficie; se expresa en %.

**Ángulo de incidencia:** ángulo formado por un rayo y la perpendicular a la superficie de reflexión.

**Constante solar** [ $I_c$ ]: Energía solar recibida en la unidad de superficie orientada perpendicularmente a la dirección de propagación de la radiación, en la unidad de tiempo, situada en la superficie exterior de nuestra atmósfera, supuesta la Tierra a la distancia media de separación entre la tierra y el sol (la constante solar se considera prácticamente constante a efectos terrestres). El valor de la constante solar es:  $I_c = 1.353 \text{ W/m}^2 = 1,940 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} = 4,871 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$

**Radiación solar** (sobre un plano): A los efectos de su utilización en la construcción puede definirse como la radiación o potencia energética que incide sobre un plano en la superficie terrestre, que proviene del sol, y es afectada por la atmósfera terrestre, la posición del sol en cualquier instante y el ángulo de incidencia de la *radiación directa* sobre cualquier superficie. (Ver Anexo I)

**Radiación extraterrestre** [ $I_0$ ]: Es la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal ubicada en el límite exterior de la atmósfera terrestre para un determinado día del año, en un determinado lugar. Se expresa en  $\text{W/m}^2$ ;

**Radiación directa** [ $I_D$ ]: es la componente de la radiación solar que no experimenta cambios en su dirección. A los efectos geométricos, proviene del centro del círculo solar.

**Radiación difusa** [ $I_d$ ]: es la componente de la radiación solar que se recibe del sol después de haber sufrido cambios de dirección al atravesar la atmósfera. Al sufrir dispersión no tiene una dirección única o preferente y a los efectos geométricos se la considera homogénea y proveniente de la bóveda celeste.

**Radiación reflejada** [ $I_r$ ]: es la componente de la radiación solar que proviene del entorno del plano de captación y su valor depende del ángulo de incidencia y del albedo o coeficiente de reflectancia del entorno.

**Radiación global o total** [ $I_G$ ]: es la suma de las componentes directa, difusa y reflejada. En el caso de considerar la radiación global sobre un plano horizontal solamente se tendrán dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa. Entonces:  $I_G = I_D + I_d + I_r$

**Intensidad o Irradiancia** [ $I$ ]: la Intensidad o potencia de la radiación solar que llega hasta la Tierra depende del espesor de la capa atmosférica que tiene que atravesar antes de alcanzar la superficie terrestre, siendo este espesor función de la altura del Sol sobre el horizonte. Esta será distinta a cada instante aunque a los efectos prácticos se utiliza la radiación horaria.

**Cantidad de energía solar o exposición solar** [ $E$ ]: Es la cantidad de energía solar por unidad de superficie incidente en una determinada región de la Tierra y depende de la intensidad o potencia energética y de la duración de la insolación solar (horas de Sol).

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I dt$$

donde:

$E$  = Energía /  $\text{m}^2$  día

$I$  = intensidad /  $\text{m}^2 = (\text{Energía} / \text{tiempo}) / \text{m}^2$

$t_1, t_2$  = horas de salida y ocaso del sol, es decir  $t_1 - t_2$  = horas de Sol.

**Índice de claridad atmosférica** [ $K_t$ ]: Es la relación entre la radiación solar extraterrestre y la radiación directa sobre un plano horizontal terrestre. Entonces:

$$\overline{Kt} = I_D / I_0$$

Cuando no se disponga de valores medidos de  $Kt$  puede estimarse con la siguiente expresión a partir de conocer la masa de aire  $m$ ;

$$\overline{Kt} = 0,5(e^{-0,65m} + e^{-0,095m})$$

Nótese que para un cielo despejado y libre de contaminación en que  $m = 1$ ,  $Kt = 0,72$

**Masa de aire  $[m]$ :** se define como la longitud de la trayectoria a través de la atmósfera que sigue la radiación solar. Al nivel del mar y cuando la trayectoria es vertical se tiene una masa de aire unitaria, o igual a 1. Para calcular la masa de aire a nivel del mar puede usarse la siguiente expresión (Kreider y Kreith, 1975):

$$m = [1,229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \alpha$$

donde:  $\alpha$  es la altura del sol sobre el horizonte en grados.

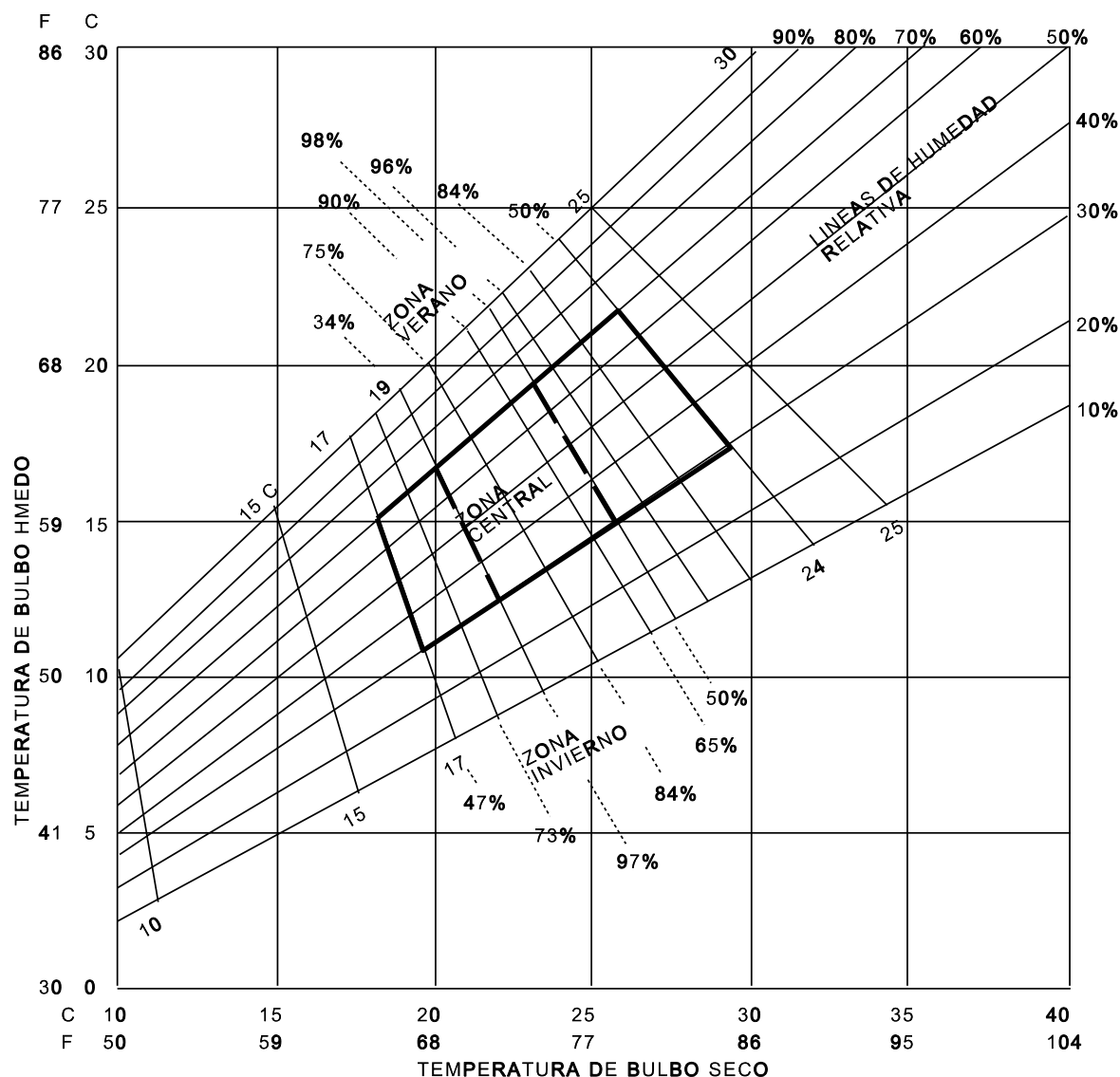
Si la presión atmosférica del lugar  $p$ , difiere de la presión atmosférica al nivel del mar  $p_0$  al valor de  $m$  debe multiplicarse por el cociente  $p / p_0$ . De acuerdo a lo anterior una masa de aire igual a cero corresponde a la radiación extraterrestre  $I_0$ .

**Tabla \_\_\_\_\_:** Valores de Albedo para distintas superficies.

Superficie	Albedo
Desierto	0,24 - 0,28
Campos, varios tipos	0,03 – 0,25
Bosque, verde	0,03 – 0,10
Pasto, varias condiciones	0,14 – 0,37
Suelo, común	0,07 – 0,20
Moho, negro	0,08 – 0,14
Arena, seca	0,18 – 0,40
Arena, húmeda	0,09 – 0,18
Hielo o nieve	0,46 – 0,86
Agua ( $\alpha = 5,5^\circ$ )	0,71

Nota: Tomado de Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C. (1961). *Daily Insolation on Surfaces Tilted toward the Equator*. Transcripción ASHRAE, pág 526-541.





**Figura 1:** Diagrama de confort higrotérmico para Aire Acondicionado (Sheppard, J.)

**Tabla 2:** Calor metabólico M, en W, según distintos tipos de actividad

Actividad	Calor Metabólico W
Durmiendo	75
Sentado tranquilamente	120
Trabajo ligero: Sentado, movimiento moderado de brazos y tronco (por ejemplo: trabajo de oficina, mecanografía)	130 – 160
Trabajo ligero: Sentado, movimiento moderado de brazos, tronco y piernas (por ejemplo tocando un instrumento)	160 – 190
Trabajo ligero: de pié, frente a una máquina o banco de trabajo, principalmente con los brazos.	160 – 190
Trabajo moderado: Sentado, movimiento intenso de brazos tronco y piernas	190 – 230
Trabajo moderado: De pie, trabajo ligero, frente a una máquina o banco de trabajo con algún desplazamiento	190 – 220
Trabajo moderado: De pie, trabajo moderado, frente a una máquina o banco de trabajo con algún desplazamiento	220 – 290
Trabajo moderado: Levantamiento y transporte moderado de pesos	290 – 400
Trabajo intenso: Levantamiento y acarreo intermitente de grandes pesos	430 – 600
Trabajo intenso: El trabajo más duro y continuado	600 – 700

Nota: valores medios para un hombre de 70 kg de peso, 1,82 m<sup>2</sup> de superficie de piel y 1,73 m de altura y actividad continuada. Temperatura ambiente 25°C y HR 50% (Belding y Hatch, 1955)

**Tabla 2b:** Disipación de calor M, en W, según distintos tipos de actividad

Grado de Actividad	Calor Metabólico (W)		
	Sensible	Latente	Total
Sentado en reposo	47	30	77
Sentado y trabajo muy liviano	47	39	86
Trabajo de oficina con cierta actividad	47	52	99
Trabajo liviano	52	69	121
Trabajo pesado	69	138	207
Trabajo muy pesado	103	224	327

## ANEXO I

## PROCEDIMIENTOS PARA EL CALCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UN PLANO

**Cálculo analítico del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre un plano horizontal.**

El cálculo del ángulo con que incide la radiación solar directa sobre un plano horizontal es equivalente a calcular la posición del Sol en la bóveda celeste con respecto al punto considerado sobre la superficie terrestre.

Al objeto de determinar la posición del Sol se utilizan dos sistemas de coordenadas, que son:

- horizontales
- ecuatoriales

Las coordenadas horizontales, que representan (como las ecuatoriales) medidas angulares, son dos:

- acimut  $A$
- altura  $h$

El acimut  $A$  mide el ángulo que forma el plano vertical que pasa por el Sol con el plano meridiano. Para la orientación Sur,  $A = 0$ ; se mide con signo negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste. Está comprendido entre  $-180^\circ \leq A \leq 180^\circ$ . La altura  $h$ , mide el ángulo con el plano horizontal. Está comprendido entre  $0^\circ \leq h \leq 90^\circ$ .

Las coordenadas ecuatoriales son:

- ángulo horario  $\omega$
- declinación  $\delta$

El ángulo horario  $\omega$  es el ángulo que forma el meridiano celeste con el círculo horario que pasa por la estrella. Este ángulo se genera por la rotación de la Tierra alrededor de su eje. Cada hora son  $15^\circ$  con signo negativo por la mañana y positivo por la tarde. A las 12 h,  $\omega = 0$ .

La declinación es el ángulo o arco del círculo horario comprendido entre el Sol y el ecuador celeste. Está comprendido entre  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ . Además conviene recordar los siguientes ángulos:

$L$  = latitud del punto de la superficie terrestre considerado, que es el ángulo que forma el radio terrestre que pasa por dicho punto con el ecuador. Está comprendida entre  $-90^\circ \leq L \leq 90^\circ$ . Para el hemisferio norte es positiva.

$\theta$  = ángulo de incidencia formado por la normal a la superficie y el rayo incidente de ella.

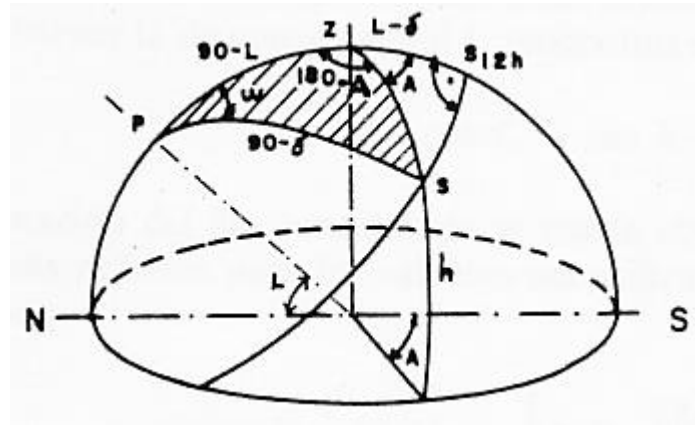
$\theta_z$  = ángulo cenital =  $90 - h$ . Comprendido entre  $0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$ . Es el ángulo que forma la visual al Sol con el cenit.

La resolución del triángulo esférico de la siguiente figura nos permite llegar a establecer las relaciones básicas entre coordenadas horizontales y ecuatoriales. Así tenemos que,

$$\sin h = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega \quad [\text{Eq. I.1}]$$

y que,

$$\cos A = \frac{\cos \delta \cos \omega - \sin h \cos L}{\cos h \sin L} \quad [\text{Eq. I.2}]$$



**Figura 2:** Triángulo esférico en la bóveda celeste (los puntos S y S<sub>12</sub> corresponden a la posición del Sol en un instante del día, S<sub>12</sub> es su posición a las 12; z es el cenit y P es el polo).

Es decir, tenemos la altura  $h$  en función de la latitud  $L$ , la declinación  $\delta$  y el ángulo horario  $\omega$  en primer lugar, y en segundo, el acimut  $A$  en función de la altura  $h$ , la latitud  $L$ , la declinación  $\delta$  y el ángulo horario  $\psi$ . Para algunos días determinados del año se pueden utilizar tablas que nos proporcionan la posición del Sol ( $h$  y  $A$ ) para las distintas horas en función de la latitud del lugar.

Otra expresión relacionada con las anteriores y obtenida a partir del citado triángulo esférico es la siguiente:

$$\tan h = \cot g(L - \delta) \cos A \quad [\text{Eq. I.3}]$$

que nos permite obtener  $h$  para un  $A$  conocido en función de los parámetros  $L$  y  $\delta$ . Existe también la siguiente relación:

$$\cos \omega = \frac{1}{\cos L \cos \delta \sqrt{1 + \tan^2(L - \delta) \frac{1}{\cos^2 A}}} - \tan L \tan \delta \quad [\text{Eq. I.4}]$$

También se puede utilizar la expresión más simple  $\sin A = (\cos \delta \sin \omega) / \cos h$ , pero la anterior tiene la ventaja de indicar cuándo el acimut es superior a  $90^\circ$ .

Cuando  $A = 0$  la altura del Sol será la máxima del día. Esta altura se denomina altura de culminación  $h_c$  la cual es igual a

$$h_c = (90 - L) \pm \delta \quad [\text{Eq. I.5}]$$

es decir, igual a la co-latitud, más (o menos) la declinación según que el período esté comprendido entre el equinoccio de primavera y el solsticio de verano, en el primer caso, o entre el equinoccio de otoño y el solsticio de invierno en el segundo caso.

Todos los ángulos correspondientes a las expresiones están medidos en grados; si queremos obtener la distancia cenital  $\theta_z$ , tendremos en cuenta que,

$$\cos \theta_z = \sin h \quad [\text{Eq. I.6}]$$

La declinación del día considerado se puede obtener de la tabla I.1, aunque para los cálculos puede utilizarse la siguiente expresión aproximada de Cooper:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad [\text{Eq. I.7}]$$

siendo  $n$  el número del día del año. Así, por ejemplo, el día 15 de octubre  $n = 288$  (ver tabla I.1).

### Cálculo de la duración del día:

Basándonos en las ecuaciones anteriores puede calcularse la *duración del día*. Así como en la salida del sol  $h = 0$  (y también en el ocaso), puede despejarse el ángulo horario correspondiente, es decir:

$$\cos \omega_0 = -\frac{\operatorname{sen} L \operatorname{sen} \delta}{\cos L \cos \delta} = \operatorname{tag} L \operatorname{tag} \delta \quad [\text{Eq. I.8}]$$

Una vez conocido el ángulo horario de la salida del sol (o del ocaso por ser simétricos) la duración del día  $T$  en horas será:

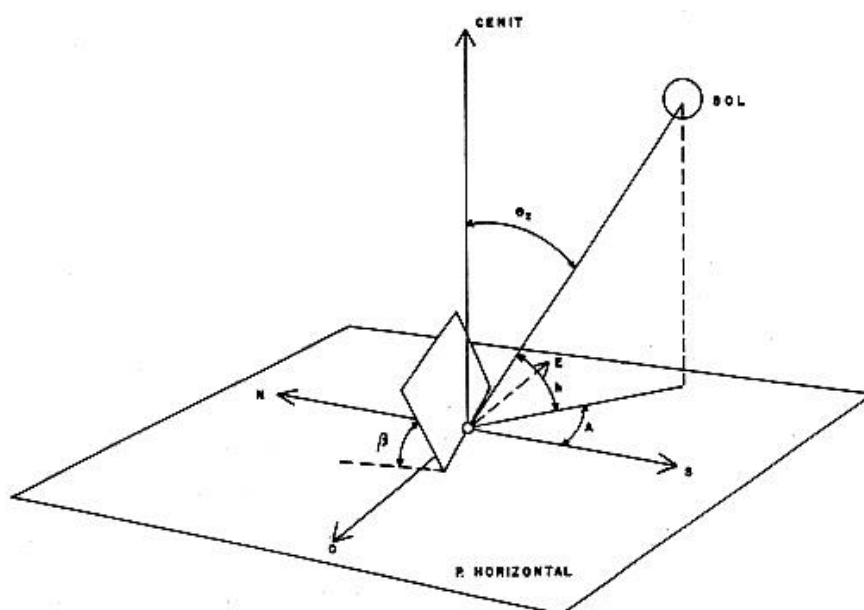
$$T = \frac{2\omega_0}{15} \quad [\text{Eq. I.9}]$$

### Cálculo del ángulo de incidencia en un plano inclinado:

En el caso de tener un plano orientado al ecuador con una inclinación  $\beta$  sobre el plano horizontal del lugar, se puede calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa con dicho plano mediante la expresión:

$$\cos \theta' = \cos(L - \beta) \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen}(L - \beta) \operatorname{sen} \delta \quad [\text{Eq. I.10}]$$

siendo  $\theta'$  el ángulo que forma de radiación directa con la vertical al plano.



**Figura 3:** Posición del sol respecto de una superficie inclinada.

Esta expresión proviene de la anterior (I.1), teniendo en cuenta que las superficies inclinadas orientadas al ecuador tienen el mismo ángulo de incidencia con respecto a la radiación directa que la que tendría una superficie horizontal para una latitud  $(L - \beta)$  (figura 4).

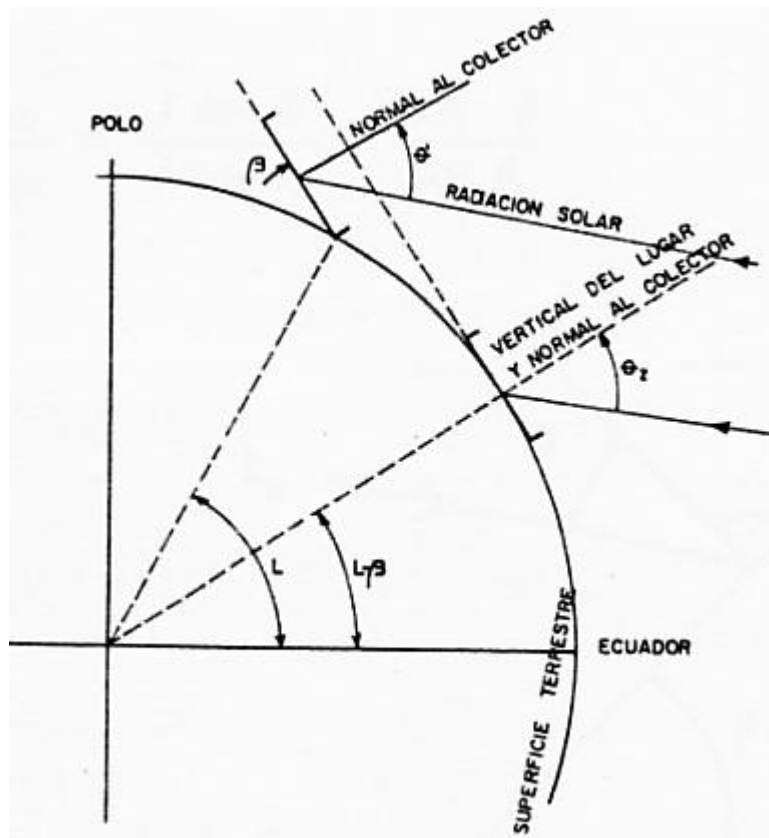


Figura 4:

A efectos del cálculo de la radiación solar directa recibida por una superficie solamente cuenta la componente normal de la radiación. Así, si la radiación directa es  $I_D$  e incide con un ángulo  $\theta'$  con respecto a la normal del plano, la radiación directa recibida por ese plano  $I'_D$  se ajusta a la ley del coseno, es decir:

$$I'_D = I_D \cos \theta' \quad [\text{Eq. I.11}]$$

### Cálculo del ángulo de incidencia en un plano cualquiera no orientado al ecuador

Para el caso general en que se desee saber el ángulo de incidencia en una superficie no orientada al ecuador (al norte en el hemisferio sur) puede utilizarse la expresión general de Bemford y de la cual son casos particulares las expresiones anteriores (planos horizontales y superficies inclinadas orientadas al ecuador). Esta expresión general es:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin L \cos \beta - \sin \delta \cos L \sin \beta \cos A + \cos \delta \cos L \cos \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin L \sin \beta \cos A \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin A \sin \omega \end{aligned} \quad [\text{Eq. I.12}]$$

### Relación entre la radiación directa sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal

Esta relación se puede expresar así:

$$R_D = \frac{I_{D\beta}}{I_{DH}} \quad [\text{Eq. I.13}]$$

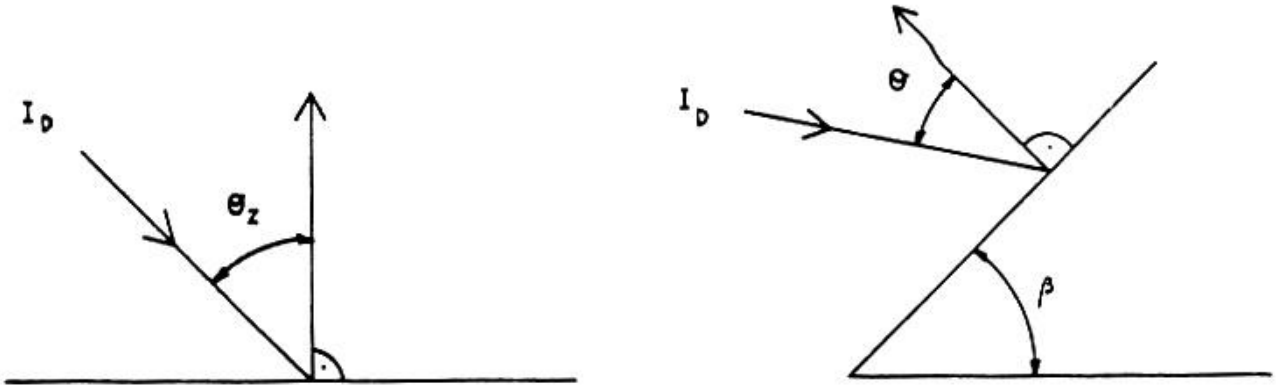
siendo:

$I_\beta$  : Irradiancia solar directa sobre una superficie inclinada, formando esta un ángulo  $\beta$  en el plano horizontal.

$I_{DH}$  : Irradiancia solar directa sobre un plano horizontal.

Esta relación es igual a:

$$R_D = \frac{I_{D\beta}}{I_{DH}} = \frac{I \cos \theta}{I \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad [\text{Eq. I.14}]$$



**Figura 5:** Incidencia del rayo solar sobre un plano horizontal y otro inclinado  $\beta$ .

siendo, por tanto, para las superficies orientadas al norte:

$$R_D = \frac{\cos(L - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(L - \beta) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta} \quad [\text{Eq. I.15}]$$

### Radiación extraterrestre en una superficie horizontal

La radiación solar sobre una superficie horizontal en el límite superior de nuestra atmósfera es:

$$I_0 = I_c [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \cos \theta_z \quad [\text{Eq. I.16}]$$

donde  $I_c$  es la constante solar,  $n$  el número del día del año y  $\theta_z$  es el ángulo que forma la radiación solar con la normal al plano horizontal. Teniendo en cuenta la expresión ya expuesta para el cálculo de  $\theta_z$  tendremos que:

$$I_0 = I_c [1 + 0,033 \cos(360n/365)] [\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega] \quad [\text{Eq. I.17}]$$

Si se desea saber la cantidad de radiación recibida en dicha superficie horizontal a lo largo de un día (exposición solar diaria),  $H_0$ , tendremos que integrar la expresión anterior para todo el tiempo que dure el día, es decir desde el amanecer al ocaso.

$$H_0 = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 d\left(\frac{24}{2\pi} \omega\right) \quad [\text{Eq. I.18}]$$

Así, se llega a la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{2\pi}{\pi} I_c [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \times [\cos L \cos \delta \sin \omega_0 + (2\pi\omega_0/360) \sin L \sin \delta] \quad [\text{Eq. I.19}]$$

donde  $\omega_0$  es la hora del ocaso en grados. Si  $I_c$  se expresa en  $\text{W/m}^2$ ,  $H_0$  vendrá en  $\text{Wh/m}^2$ . Para expresar  $H_0$  en julios/ $\text{m}^2$  hay que tener en cuenta que  $1 \text{ Wh} = 3,6 \times 10^3$  julios.

Puede aplicarse la expresión anterior de  $H_0$  para obtener el promedio mensual de radiación media diaria  $H_0$  de uso frecuente en los cálculos de radiación solar. Basta para ello utilizar como datos de  $n$  y  $\delta$  los correspondientes al día medio del mes considerado.

**Tabla I.3:** Valores de  $n$  recomendados para los días medios de cada mes del año.

Mes	Día del mes	n, día del año	Declinación
Enero	17	17	-20,9
Febrero	16	47	-13
Marzo	16	75	- 2,4
Abril	15	105	9,4
Mayo	15	135	18,8
Junio	11	162	23,1
Julio	17	198	21,2
Agosto	16	228	13,5
Septiembre	15	258	2,2
Octubre	15	288	- 9,6
Noviembre	14	318	-18,9
Diciembre	10	344	-23

**Tabla I.3:** Valores indicativos tabulados de  $H_0$  para latitudes comprendidas entre 0 y  $60^\circ$  expresados en  $\text{MJ/m}^2$  para  $I_c = 1.323 \text{ W/m}^2$ .

RADIACION EXTRATERRESTRE MEDIA DIARIA MENSUAL												
$H_0$ en $\text{MJ/m}^2$ para $I_c = 1.323 \text{ W/m}^2$												
Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
60	3.5	8.2	16.7	27.3	36.3	40.6	38.4	30.6	20.3	10.7	4.5	2.3
55	6.1	11.2	19.6	29.3	37.2	40.8	39.0	32.2	22.9	13.6	7.2	4.8
50	9.1	14.2	22.3	31.2	38.1	41.1	39.6	33.7	25.3	16.6	10.2	7.6
45	12.1	17.2	24.8	32.9	38.8	41.3	40.0	45.0	27.5	19.4	13.2	10.5
40	15.1	20.1	27.2	34.3	39.3	41.3	40.2	36.1	29.5	22.1	16.2	13.6
35	18.1	22.8	29.3	35.5	39.5	41.1	40.2	36.9	31.3	24.7	19.1	16.7
30	21.1	25.5	31.2	36.4	39.6	40.7	40.0	37.5	32.9	27.1	22.0	19.7
25	23.9	27.9	32.9	37.1	39.4	40.0	39.6	37.8	34.2	29.3	24.8	22.6
20	26.7	30.2	34.4	37.5	38.9	39.1	38.9	37.8	35.3	31.3	27.4	25.5
15	29.3	32.3	35.5	37.6	38.1	38.0	37.9	37.6	36.1	33.1	29.8	28.2
10	31.7	34.1	36.4	37.5	37.1	36.6	36.7	37.1	36.6	34.6	32.1	30.8
5	33.9	35.7	37.1	37.1	35.9	35.0	35.3	36.3	36.8	35.9	34.1	33.1
0	35.9	37.0	37.4	36.4	34.4	33.2	33.6	35.3	36.8	36.9	36.0	35.3

Hasta aquí se obtuvo la radiación extraterrestre instantánea y diaria sobre una superficie horizontal. Si se quisiera hallar la radiación extraterrestre horaria habría que integrar la expresión para un período de una hora comprendido entre los ángulos horarios  $\omega_1$  y  $\omega_2$ . Se obtiene la expresión:

$$I_0 = \frac{12}{\pi} I_c [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \times [\cos L \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (2\pi(\omega_2 - \omega_1)/360) \sin L \sin \delta] \quad [\text{Eq. I.20}]$$



Esta expresión es aplicable para períodos de tiempo distintos de una hora. Se supone que  $\omega_1 > \omega_2$ .

**Referencias bibliográficas:**

- Kreider, J.F. y Kreith, F. (1975). *Solar heating and cooling*. Edit. Mc Graw-Hill.
- Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (1974). *Solar Energy Termal Processes*. Edit. Willey.
- Yañez, G. (1984). *Energía Solar, Edificación y Clima*. Edit. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, España.
- Quadri, N.P. (1993). *Instalaciones de aire acondicionado y calefacción*. Edit. Alsina, Buenos Aires.